

Πανελλήνιο Συνέδριο της Διδακτικής των Φυσικών Επιστημών και Νέων Τεχνολογιών στην Εκπαίδευση

Τόμ. 13 (2024)

13ο Πανελλήνιο Συνέδριο Διδακτικής των Φυσικών Επιστημών και Νέων Τεχνολογιών στην Εκπαίδευση: ΠΡΑΚΤΙΚΑ

**13^ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΔΙΔΑΚΤΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΚΑΙ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ**

**Νέες Τάσεις και Έρευνα στη Μάθηση, τη Διδασκαλία
και τις Τεχνολογίες στις Φυσικές Επιστήμες**

10 - 12 Νοεμβρίου 2023

Διοργάνωση
Εργαστήριο Εκπαίδευσης και Διδασκαλίας της Φυσικής,
Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής Εκπαίδευσης,
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

Πληροφορίες
synedrio2023.enephet.gr

Τόπος διεξαγωγής
Παιδαγωγικό Τμήμα
Δημοτικής Εκπαίδευσης

ΠΡΑΚΤΙΚΑ
Επιμέλεια έκδοσης:
Κωνσταντίνος Θ. Κώτσης, Γεώργιος Στύλος,
Γεωργία Βακάρου, Λεωνίδα Γαβριλάς, Δημήτρης Πανάγου

Ιωάννινα
10 έως 12 Νοεμβρίου 2023

ΕΝΕΦΕΤ
Έμφαση για την Αποδοτικότητα στην
Εκπαίδευση με τις Νέες Τεχνολογίες

Ένα ανατρεπτικό κείμενο για την κατανόηση της έννοιας της μαύρης τρύπας στη Δευτεροβάθμια εκπαίδευση

Νικόλαος Βλαχοστεργίος, Αναστάσιος Ζουπίδης,
Δημήτριος Πνευματικός

doi: [10.12681/codiste.7014](https://doi.org/10.12681/codiste.7014)

ΕΝΑ ΑΝΑΤΡΕΠΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΝΟΙΑΣ ΤΗΣ ΜΑΥΡΗΣ ΤΡΥΠΑΣ ΣΤΗ ΔΕΥΤΕΡΟΒΑΘΜΙΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ

Νικόλαος Βλαχοστεργίος¹, Αναστάσιος Ζουπίδης², Δημήτριος Πνευματικός³

¹Μετ. Φοιτητής ΠΜΣ ΔιΦΕΤ ΑΠΘ, ²Επίκουρος Καθηγητής ΠΤΔΕ ΔΠΘ, ³Καθηγητής ΠΤΔΕ ΠΔΜ

nikolaosvlachostergios@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της εργασίας ήταν η δημιουργία ενός ανατρεπτικού κειμένου το οποίο θα μπορούσε να αξιοποιηθεί στη διδασκαλία της έννοιας της μαύρης τρύπας στη δευτεροβάθμια εκπαίδευση. Για τον σκοπό αυτό, προηγήθηκε α) ιστορική καταγραφή της πορείας της έννοιας και β) βιβλιογραφική ανασκόπηση για την χαρτογράφηση των πιθανών εναλλακτικών ιδεών που συνδέονται με τις μαύρες τρύπες. Για την βιβλιογραφική ανασκόπηση αξιοποιήθηκε η μηχανή αναζήτησης Google Scholar. Η ανασκόπηση ανέδειξε ότι η έρευνα πάνω στο πεδίο αυτό είναι περιορισμένη και ότι οι δημοφιλέστερες εναλλακτικές ιδέες για τις μαύρες τρύπες είναι (α) ότι θα ρουφήξουν τα πάντα στο σύμπαν και (β) ότι είναι «μαύρες» σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Το προτεινόμενο ανατρεπτικό κείμενο για τις ιδέες αυτές αναπτύσσεται στο πλαίσιο μιας εκπομπής σε έναν ραδιοφωνικό σταθμό, όπου ένας μαθητής συζητάει με μία φυσικό τους προβληματισμούς του σχετικά με τις μαύρες τρύπες.

Λέξεις Κλειδιά: μαύρες τρύπες, εναλλακτικές ιδέες, ανατρεπτικό κείμενο

A REFUTATIONAL TEXT ABOUT THE UNDERSTANDING OF THE CONCEPT OF BLACK HOLE IN SECONDARY EDUCATION

Nikolaos Vlachostergios¹, Anastasios Zoupidis², Dimitrios Pnevmatikos³

¹ MsC student Physics Dpt ATh, ²Assistant Professor DPLE DUTH, ³Professor DPLE UoWM

nikolaosvlachostergios@gmail.com

ABSTRACT

This study aimed to develop a refutational text that could be incorporated into the teaching of the concept of black holes in secondary education. To achieve this, a literature review was conducted focusing on a) the historical evolution of the concept and b) the alternative ideas that can be associated with black holes. The literature search was performed using the research database "Google Scholar" revealing that research in this field is limited. The most prevalent alternative conceptions about black holes identified were a) that they can absorb everything in the universe and b) that they appear "black" across the entire electromagnetic spectrum. The proposed refutational text addressing these misconceptions is presented in the form of a radio broadcast, where a student engages in a discussion with a physicist about his concerns regarding black holes.

Keywords: alternative conceptions, black holes, refutational text

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο φυσικός John Wheeler ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε τον όρο «μαύρες τρύπες» σε μια διάλεξη που έδωσε στις 29 Δεκεμβρίου 1967 στο συνέδριο της Αμερικανικής Ένωσης για την Προώθηση της Επιστήμης (AAAS) στη Νέα Υόρκη προκειμένου να αντικαταστήσει τη πιο περίπλοκη και δύσχρηστη φράση «βαρυτικά πλήρως καταρρεύσαν αντικείμενο» (Wheeler & Ford, 1998). Έκτοτε πολλά βιβλία εκλαϊκευμένης επιστήμης, ταινίες και δελτία ειδήσεων μεταφέρουν στο ευρύ κοινό εικόνες ή εξελίξεις σχετικά με την έρευνα για τις μαύρες τρύπες, σε μια προσπάθεια να περιγράψουν και να αναλύσουν τις ιδιότητες αυτών των αντικειμένων. Ως αναπόσπαστο μέρος σχολικών ή πανεπιστημιακών προγραμμάτων σπουδών, οι μαύρες τρύπες αποτελούν πλέον ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα για πολλούς μαθητές και μαθήτριες. Ωστόσο, δεν φαίνεται να έχει διερευνηθεί εάν οι μαθητές και οι μαθήτριες έχουν δυσκολίες στην κατανόησή τους και λίγα γνωρίζουμε για τα νοητικά μοντέλα που έχουν οι μαθητές και οι μαθήτριες πάνω στην έννοια των μαύρων τρυπών (Malte Ubben, 2022) και ποιες, εφόσον υπάρχουν, είναι οι εναλλακτικές ιδέες που ο ανθρώπινος νους δημιουργεί στην προσπάθειά του να δημιουργήσει την νοητική αναπαράσταση για την έννοια «μαύρη τρύπα» στο πλαίσιο της αστρονομίας (Pinochet, 2019).

Με τον όρο εναλλακτικές ιδέες περιγράφουμε τις αναπαραστάσεις, ιδέες, θεωρίες ή προσεγγίσεις που αποκλίνουν από την κυρίαρχη αποδεδειγμένη άποψη ή θεωρία για μια έννοια, τις οποίες τα άτομα κατασκευάζουν στην προσπάθειά τους να κατανοήσουν τον κόσμο (Βοσνιάδου, 1999) και ως εκ τούτου, δεν είναι πάντοτε επιστημονικά αξιόπιστες. Στην εκπαίδευση, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν οι εναλλακτικές ιδέες που κατασκευάζουν οι μαθητές στην προσπάθειά τους να κατανοήσουν τις επιστημονικές έννοιες ή ένα φυσικό φαινόμενο που μελετάται στο πλαίσιο του σχολείου, να επικοινωνήσουν σχετικά με αυτό με άλλους ανθρώπους (π.χ. συμμαθητές τους), ή να επιλύσουν κάποιο πρόβλημα. Σύμφωνα με τη Θεωρία Πλαισίου, οι εναλλακτικές ιδέες των μαθητών, αλλά και των αρχαρίων σε μια επιστήμη, προκύπτουν από την προσπάθεια δημιουργίας ενός νοητικού μοντέλου στο οποίο οι νέες πληροφορίες για μία έννοια και οι προϋπάρχουσες εννοιολογικές δομές που εκτιμούν ότι σχετίζονται με τις έννοιες αυτές συνθέτουν ένα συνεκτικό σχήμα με το οποίο ερμηνεύουν τα φαινόμενα που σχετίζονται με τις έννοιες αυτές (Vosniadou, 2013). Αν και τα νοητικά αυτά μοντέλα σχηματίζονται στην στιγμή, όταν επαναλαμβάνονται μπορούν να αποκτήσουν στοιχεία εδραιωμένων πεποιθήσεων και θεωριών που ενίοτε εμποδίζουν την απόκτηση των επιστημονικών θεωριών για τις ίδιες έννοιες ή φαινόμενα. Για τον λόγο αυτό, ακόμη και μετά από χρόνια σχολικής εκπαίδευσης τα άτομα εξακολουθούν να διατηρούν εναλλακτικές ιδέες ή παρανοήσεις για μια σειρά εννοιών και φαινομένων στην επιστήμη. Κρίνεται έτσι, ως σημαντικός εκπαιδευτικός και διδακτικός χειρισμός, ο εντοπισμός των εναλλακτικών ιδεών των μαθητών για μία έννοια προκειμένου οι εκπαιδευτικοί με τους κατάλληλους χειρισμούς να βοηθήσουν τους μαθητές να αναστοχαστούν για τις απόψεις τους και στη συνέχεια να τις αποδομήσουν προκειμένου να κατακτήσουν την τρέχουσα επιστημονικά αποδεκτή άποψη για μία έννοια ή φαινόμενο.

Συχνά οι εναλλακτικές ιδέες των μαθητών ακολουθούν την πορεία της επιστημονικής σκέψης για την κατανόηση των ίδιων φαινομένων (Thagard, 1993). Έτσι, η ιστορική πορεία μιας έννοιας, μπορεί να αξιοποιηθεί ως ένα διδακτικό εργαλείο, διότι βοηθά στην κατανόηση των δυσκολιών που είχαν οι επιστήμονες στην κατανόηση των εννοιών και των αλλαγών σε διάφορα επίπεδα (οντολογικών ή επιστημολογικών προϋποθέσεων) που απαιτήθηκαν προκειμένου να προχωρήσουν σε μια πληρέστερη κατανόηση του φαινομένου. Επίσης, ένα διδακτικό εργαλείο το οποίο βοηθά στην αποδόμηση των εναλλακτικών ιδεών είναι η χρήση «ανατρεπτικών κειμένων». Τα «ανατρεπτικά κείμενα» στοχεύουν στη διδασκαλία εννοιών και φαινομένων για τα οποία οι μαθητές έχουν μέσα από την καθημερινή τους εμπειρία κατασκευάσει κάποια ή κάποιες εναλλακτικές ιδέες. Η εφαρμογή τους είναι απλή (Schroeder & Kucera, 2022). Ξεκινούν από την παρουσίαση κάποιας εναλλακτικής ιδέας (όπως προκύπτει μέσα από την έρευνα) (βήμα 1), και στην συνέχεια,

δημιουργούν μέσα από διαλεκτικές ερωτήσεις (βήμα 2) γνωστικές συγκρούσεις που στοχεύουν στην ανατροπή των εναλλακτικών ιδεών (βήμα 3). Στο σημείο αυτό, η γνώση της ιστορικής πορείας των εννοιών και των συγκρούσεων που οι επιστήμονες διαχειρίστηκαν μπορεί να αξιοποιηθεί με επιτυχία. Τέλος, παρουσιάζεται και τεκμηριώνεται επιστημονικά η νέα επιστημονική έννοια και τα φαινόμενα που εξηγεί.

Οι μαύρες τρύπες

Μία μαύρη τρύπα είναι μία περιοχή χωρόχρονου που περιορίζεται από μία κλειστή επιφάνεια που λέγεται ορίζοντας, όπου υπάρχει τεράστια συγκέντρωση μάζας – ενέργειας όπου τίποτα δεν μπορεί να δραπέτευσει από τη βαρυτική της έλξη, ούτε το φως. Στο πλαίσιο της νευτώνιας βαρύτητας, ο ορίζοντας μπορεί διαισθητικά να παρασταθεί σαν μία σφαιρική επιφάνεια ακτίνας:

$$R_s = \frac{2GM_{BH}}{c^2} = 1,48 \cdot 10^{-27} m \left(\frac{M_{BH}}{kg} \right)$$

Για ιστορικούς λόγους η ακτίνα αυτή ονομάζεται ακτίνα Schwarzschild, όπου $G=6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$ είναι η βαρυτική σταθερά, $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό και M_{BH} είναι η μάζα της μαύρης τρύπας, δηλαδή η μάζα που κλείνεται από τον ορίζοντα γεγονότων (Pinochet, 2019).

Η Schwarzschild ή αλλιώς στατική μαύρη τρύπα έχει ένα σημείο στο κέντρο που ονομάζεται βαρυτική μοναδικότητα (singularity), όπου υπάρχει άπειρη καμπύλωση του χωροχρόνου και δεν περιστρέφεται. Μία περιστρεφόμενη μαύρη τρύπα ή αλλιώς Kerr είναι αρκετά πιο περίπλοκη από την στατική. Οι περισσότερες μαύρες τρύπες ανήκουν στην κατηγορία Kerr καθώς τα αστέρια τους περιστρεφότανε όταν κατέληξαν σε μαύρες τρύπες. Η βαρυτική μοναδικότητα της Kerr μαύρης τρύπας δεν είναι ένα σημείο αλλά ένα δακτυλίδι και το σχήμα του ορίζοντα γεγονότων της είναι ελλειψοειδές. Στα πλαίσια αυτή της εργασίας όμως, θα ασχοληθούμε με τις στατικές μαύρες τρύπες.

Τέλος, σημαντικό είναι να γίνει μία αναφορά στην ακτινοβολία Hawking. Ο φυσικός S. W. Hawking το 1976 κάνει μία νέα μεγάλη θεωρητική ανακάλυψη. Συμπεραίνει ότι «υπάρχει μία στενή σύνδεση μεταξύ των μαύρων τρυπών και της θερμοδυναμικής, η οποία προκύπτει καθώς πληροφορία χάνεται μέσα στη μαύρη τρύπα. Εάν κάποιος υποθέσει ότι η μέγιστη πληροφορία που χάνεται σε μία μαύρη τρύπα δεδομένης μάζας, στροφορμής και φορτίου είναι πεπερασμένη, αυτό που ακολουθεί είναι πως πρέπει να συσχετιστεί μία εντροπία με τη μαύρη τρύπα και έτσι πρέπει να εκπέμπει θερμική ακτινοβολία σε κάποια μη μηδενική πεπερασμένη θερμοκρασία» (Hawking, 1974, 1976). Εξάγοντας λοιπόν το παραπάνω συμπέρασμα, έμεινε γνωστή μια φράση του S.W. Hawking «Οι μαύρες τρύπες ίσως να μην είναι και τόσο μαύρες τελικά!» καθώς μπορούν και εκπέμπουν ακτινοβολία (Pinochet, 2019).

Ιστορική αναδρομή για την έννοια «μαύρη τρύπα»

Η ιδέα ενός σώματος που μπορεί να έχει τόση πολύ μάζα συγκεντρωμένη που ούτε το φως να μην μπορεί να διαφύγει από αυτό, διατυπώθηκε πρώτη φορά το 1783 από τον Γεωλόγο John Mitchell σε μια εργασία του στην Βασιλική Ακαδημία της Αγγλίας. Η αρχική ιδέα της μαύρης τρύπας (χωρίς να γίνεται αναφορά στον όρο «μαύρη τρύπα») αναφέρεται από το John Mitchell το 1783 όταν μελετούσε μια υποθετική μέθοδο για να υπολογιστεί η μάζα κάποιου αστεριού. Ο Mitchell αποδεχότανε τη θεωρία του Νεύτωνα ότι δηλαδή το φως αποτελείται από μικρά υλικά σωματίδια. Έτσι σκέφτηκε ότι αυτά τα σωματίδια όπως εξέρχονται από την επιφάνεια ενός άστρου θα πρέπει να επιβραδύνονται εξαιτίας της βαρυτικής έλξης του. Έτσι, υπέθεσε ότι θα πρέπει να υπάρχει ένα είδος άστρων, στα οποία η ταχύτητα διαφυγής να είναι τόσο μεγάλη που ούτε το φως δεν μπορεί να διαφύγει. Ονόμασε αυτά τα αστέρια «Σκοτεινά Αστέρια» (Mitchel, 1784).

Λίγα χρόνια μετά, το 1796 ο μαθηματικός Pierre – Simon Laplace υποστήριξε την ιδέα του Mitchell στις πρώτες δύο εκδόσεις του World System Exposition, αλλά η ιδέα αυτή ακουγόταν απίθανη τον 19^ο αιώνα, καθώς δεν ήταν ακόμη γνωστό ότι το φως μπορεί να επηρεαστεί από τη βαρυτική δύναμη (το φως θεωρούνταν

ένα άμαζο σωματίδιο και δεν μπορούσε να επηρεαστεί από τη βαρύτητα) (Montgomery et al, 2009). Έτσι, η ιδέα της μαύρης τρύπας πέρασε στη λήθη για τα επόμενα 100 περίπου χρόνια. Από αυτή την έβγαλε ο Γερμανός επιστήμονας (εβραϊκής καταγωγής) Albert Einstein το 1915, οπότε και δημοσίευσε την Γενική Θεωρία της Σχετικότητας. Ο Einstein απέδειξε ότι η βαρύτητα μπορεί να επηρεάσει το φως (Bush, 1999 · Petrescu et al, 2018).

Λίγους μήνες μετά, ένας άλλος Γερμανός φυσικός με εβραϊκή καταγωγή, ο Karl Schwarzschild, ο οποίος είχε καταταγεί εθελοντικά στο γερμανικό στρατό για να πολεμήσει στον 1^ο Παγκόσμιο Πόλεμο, και ενόσω βρισκονταν στο μέτωπο στη Ρωσία, κατάφερε να γράψει δύο πολύ σημαντικές εργασίες. Σε αυτές υπολογίζει τις ακριβείς λύσεις των εξισώσεων των πεδίων του Einstein για τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας και την κβαντική θεωρία του Planck. Ήταν ο πρώτος που κατάφερε να δώσει ακριβείς λύσεις στις εξισώσεις του Einstein, οι οποίες περιγράφουν το βαρυτικό πεδίο γύρω από ένα σφαιρικό, συμμετρικό, μη – περιστρεφόμενο σώμα (Schwarzschild, 1992).

Παρόλα αυτά, η θεωρία των μαύρων τρυπών, όπως την γνωρίζουμε σήμερα, ξεκίνησε από την καινοτόμα δουλειά του Subrahmanyan Chandrasekhar. Ο S. Chandrasekhar, ξεκινώντας από την Βομβάη (Ιούλιος 1930) για την Αγγλία, μελετούσε τις εργασίες του Fowler πάνω στους λευκούς νάνους. Στην ηλικία των 19 ετών υποστήριξε ότι σύμφωνα με τη Γενική Θεωρία της Σχετικότητας, σε συνδυασμό με την αρχή του Pauli, ένα αστέρι που έχει μάζα μεγαλύτερη από $1,4 \cdot M_{\text{ήλιου}}$ (το λεγόμενο όριο Chandrasekhar), όταν εκραγεί αφήνει πίσω του ένα μικρό αστέρι που λέγεται λευκός νάνος. Αν το αστέρι έχει μεγαλύτερη μάζα από αυτή τότε αφήνει πίσω του μοναδικότητα Schwarzschild (Petrescu, 2018).

Το 1939 ο Einstein δημοσιεύει μία εργασία στην οποία αναλύει για ποιο λόγο δεν θα μπορούσε να υπάρχει με βάση την Γενική Θεωρία της Σχετικότητας η μοναδικότητα Schwarzschild (Einstein, 1939). Παράλληλα, οι Oppenheimer & Volkoff το ίδιο έτος υπολόγισαν την μέγιστη μάζα ενός άλλου αστρικού σώματος, του αστέρα νετρονίων. Όταν ένα τέτοιο αστέρι καταρρεύσει μπορεί να αφήσει πίσω του όχι απαραίτητα έναν λευκό νάνο, αλλά έναν αστέρα νετρονίων. Η μέγιστη μάζα που υπολόγισαν είναι $0,7 M_{\text{ήλιου}}$, η οποία είναι κάτω από το ανώτερο όριο για τους λευκούς νάνους. Αλλά αργότερα (1996) υπολογίστηκε ότι αυτό το όριο βρίσκεται ανάμεσα στις 2,2 και 2,9 $M_{\text{ήλιου}}$ (Kalogera, 1996).

Παράλληλα όμως με τη θεωρητική ανάπτυξη της έννοιας των μαύρων τρυπών (οι οποίες δεν είχαν βαφτιστεί ακόμη έτσι) εξελίσσεται και η παρατηρησιακή αστρονομία. Η παρατηρησιακή αναζήτηση υποψηφίων μαύρων τρυπών είναι στενά συνδεδεμένη με την αστρονομία ακτίνων – X. Το 1962 και 1963, μετά από την εκτόξευση ρουκετών Aerobee σε τροχιά γύρω από την Γη με στόχο να μετρήσει τις πιο «δυνατές» πηγές ακτίνων – X, βρέθηκε μεταξύ άλλων ότι μια από τις πιο δυνατές πηγές ακτίνων – X είναι ένα συμπαγές αντικείμενο (compact object) στον αστερισμό του Κύκνου (Cygnus X -1), και του Τοξότη (Sgr A*) (Bowyer, 1965). Οι επιστήμονες δεν μπορούσαν εκείνη την περίοδο να αποφανθούν με σιγουριά για το τι είναι ο Cygnus X-1, αλλά παρόλα αυτά παρέμεινε ένας καλός υποψήφιος, να είναι δηλαδή ένα ουράνιο σώμα που αργότερα ονομάστηκε *μαύρη τρύπα* (Celotti, 1999). Ο όρος «Μαύρη Τρύπα» φαίνεται ότι χρησιμοποιήθηκε πρώτα για το αντικείμενο που προέκυπτε από την κατάρρευση ενός αστέρα, μόνο που δεν έγινε από φυσικούς και έτσι ο όρος σύντομα ξεχάστηκε. Ο John Wheeler, ένας από τους καλύτερους φυσικούς του κόσμου, θυμάται ότι χρησιμοποίησε αυτόν τον όρο για πρώτη φορά το 1967, όταν έδινε μία διάλεξη και κάποιος του τον φώναξε σαν πρόταση σε κάτι που έλεγε. Έτσι, άρχισε να τον χρησιμοποιεί και σύντομα ο όρος έγινε παγκόσμια γνωστός (Misner, 2009).

Οι μαύρες τρύπες, αποτελούν μέρος της διδακτέας ύλης στη φυσική προσανατολισμού στη Β' Λυκείου (Οδηγίες Διδασκαλίας Φυσικής Λυκείου), αλλά παρόλα αυτά είναι ακόμη ένα ανεξερεύνητο κομμάτι της διδακτικής των ΦΕ, όσον αφορά το ποιες είναι οι εναλλακτικές ιδέες των μαθητών πάνω σε αυτές και ποιες στρατηγικές θα μπορούσαν να ακολουθηθούν ώστε να αντιμετωπιστούν. Στόχος της εργασίας ήταν η

δημιουργία ενός ανατρεπτικού κειμένου το οποίο θα μπορούσε να αξιοποιηθεί στη διδασκαλία αυτής της ενότητας. Για τον σκοπό αυτό, προηγήθηκε α) ιστορική καταγραφή της πορείας της έννοιας και β) βιβλιογραφική ανασκόπηση για την χαρτογράφηση των πιθανών εναλλακτικών ιδεών που συνδέονται με τις μαύρες τρύπες.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η αναζήτηση πληροφοριών για τον εντοπισμό των εναλλακτικών ιδεών των μαύρων τρυπών έγινε στις βάση δεδομένων Google Scholar. Κατά την αναζήτηση των εναλλακτικών ιδεών οι κύριες λέξεις κλειδιά ήταν «"black holes" and "misconceptions" and "students" and "Schwarzschild"». Κατά την αναζήτηση στο Google Scholar εμφανίστηκαν 132 αποτελέσματα, από αυτά τα τέσσερα άρθρα αναφερόντουσαν στις εναλλακτικές ιδέες, ενώ τα 128 αναφερόντουσαν σε αλλαγές επιστημονικών παραδειγμάτων ή σε πολύ επιστημονικά θέματα των μαύρων τρυπών.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι εναλλακτικές ιδέες πάνω στις μαύρες τρύπες

Αν και η βιβλιογραφική έρευνα πάνω στις εναλλακτικές αντιλήψεις των μαύρων τρυπών δεν είναι ακόμη πολύ ανεπτυγμένη, μέσα από την βιβλιογραφική αναζήτηση εντοπίστηκαν κάποιες από αυτές που αφορούν το τι είναι και τι μπορεί να κάνει μία μαύρη τρύπα. Οι βασικότερες από αυτές είναι ότι οι μαύρες τρύπες: (1) θα ρουφήξουν τα πάντα στο σύμπαν (Riggs, 2019), (2) ζουν για πάντα (Comins, 2001), (3) είναι άδειος χώρος (Comins, 2001), (4) είναι «μαύρες» σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (Pinochet, 2019), και (5) έχουν πολύ μεγάλη μέση πυκνότητα (Pinochet, 2019). Οι δημοφιλέστερες από τις παραπάνω πέντε εναλλακτικές ιδέες φαίνεται ότι είναι η (1) και η (4) (Pinochet, 2019· Riggs, 2019), οι οποίες και ενσωματώνονται στο ανατρεπτικό κείμενο.

Η πρώτη εναλλακτική ιδέα αφορά στην αντίληψη ότι οι μαύρες τρύπες θα ρουφήξουν τα πάντα στο σύμπαν (Riggs, 2019). Στην δημιουργία αυτής της αντίληψης μπορούν να συνεισφέρουν διάφοροι παράγοντες, όπως η ραγδαία αύξηση του ενδιαφέροντος μεταξύ μη – ειδικών, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται πολλές φορές παρανοήσεις. Για παράδειγμα, αφορμή για αυτές τις ιδέες είναι οι μη ακριβείς απεικονίσεις ή περιγραφές για τις μαύρες τρύπες που απεικονίζονται σε ταινίες επιστημονικής φαντασίας. Ο λόγος που η παραπάνω ιδέα αποτελεί μία εναλλακτική ιδέα, όπως αναφέρει και ο Riggs (2019), είναι ότι η βαρύτητα έξω από ένα σφαιρικό αστέρι μάζας M είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που προκύπτει από μία μαύρη τρύπα ίδιας μάζας. Παρόλα αυτά, ξέρουμε πως τα αστέρια δεν απορροφούν τα πάντα γύρω τους, και αυτό ισχύει και για τις μαύρες τρύπες. Στην πραγματικότητα οι πλανήτες έχουν σταθερή τροχιά γύρω από αστέρια για δεκατομμύρια χρόνια. Αυτό σημαίνει ότι αν αντικαταστήσαμε τον Ήλιο με μία μαύρη τρύπα ίδιας μάζας με του Ήλιου, δεν θα παρατηρούσαμε τίποτα στη Γη εκτός από την εμφανή απουσία του ηλιακού φωτός.

Η δεύτερη εναλλακτική ιδέα αφορά στην αντίληψη ότι οι μαύρες τρύπες είναι μαύρες, δηλαδή ότι δεν μπορεί καμία ακτινοβολία οποιουδήποτε μήκους κύματος να «ξεφύγει» από αυτή (Pinochet, 2019). Η ιδέα αυτή μπορεί να ανιχνευθεί στην ιστορική εξέλιξη για την ιδέα της μαύρης τρύπας. Πριν τον Stephen Hawking η έννοια της μαύρης τρύπας αντιστοιχούσε σε ένα αντικείμενο το οποίο μπορεί να απορροφάει φως ή ύλη χωρίς τίποτα να του ξεφεύγει. Αυτή η αντίληψη κυριαρχούσε μέχρις ότου το 1975 όπου ο Stephen Hawking συνδυάζοντας την γενική θεωρία της σχετικότητας με την κβαντομηχανική οδηγήθηκε στο συμπέρασμα ότι μία απομονωμένη μαύρη τρύπα έχει θερμοκρασία και εκπέμπει θερμική ακτινοβολία από τον ορίζοντα γεγονότων σε όλες τις κατευθύνσεις· όπως είπε ο ίδιος ο Hawking «Οι μαύρες τρύπες δεν είναι τόσο μαύρες τελικά» (Pinochet, 2019). Αυτή η ακτινοβολία είναι σημαντική μόνο για αντικείμενα όπως οι μικρές μαύρες

τρύπες (micro – black holes). Παρόλο που αυτά τα αντικείμενα δεν έχουν ανιχνευθεί ακόμη, και δεν υπάρχουν εμπειρικές αποδείξεις για την ύπαρξη της ακτινοβολίας Hawking, οι ειδικοί πάνω στο θέμα συμφωνούν ότι η ακτινοβολία Hawking υπάρχει, για λόγους συνοχής με άλλες φυσικές θεωρίες που έχουν επιβεβαιωθεί ευρέως (Pinochet, 2019).

Το ανατρεπτικό κείμενο

Με βάση τα παραπάνω ευρήματα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση σχεδιάστηκε ένα ανατρεπτικό κείμενο για την έννοια της μαύρης τρύπας, το οποίο στοχεύει σε δύο βασικές παρανοήσεις: (α) ότι οι μαύρες τρύπες μπορούν να ρουφήξουν τα πάντα στο σύμπαν και (β) ότι είναι «μαύρες», σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Ενδεικτικά, παρατίθεται στο Παράρτημα το ανατρεπτικό κείμενο για την πρώτη παρανόηση. Ως πλαίσιο του ανατρεπτικού κειμένου επιλέχθηκε μια εκπομπή σε έναν ραδιοφωνικό σταθμό. Πιο συγκεκριμένα, δίνεται φωνή σε αυτές τις δύο ιδέες μέσω ενός μαθητή, του Κώστα, ο οποίος συζητάει με μία φυσικό με στόχο να κατευθάσει τους προβληματισμούς του σχετικά με τις μαύρες τρύπες. Αφορμή για τις ανησυχίες του Κώστα είναι διάφορα άρθρα στα οποία γίνεται λόγος για τον κίνδυνο δημιουργίας μιας μαύρης τρύπας σε κάποιο ερευνητικό εργαστήριο. Όλα αυτά, τραβάνε και απασχολούν τον Κώστα ο οποίος διαβάζοντας για όλους αυτούς τους κινδύνους αποφασίζει να ψάξει τι είναι μία μαύρη τρύπα και κατά πόσο είναι τόσο επικύνδινη όσο λέγεται.

Όντας στην εκπομπή ο Κώστας ρωτάει την φυσικό «κ. Μελίντα» διάφορες ερωτήσεις που έχουν προκύψει από την προσωπική του μελέτη για τις μαύρες τρύπες. Για παράδειγμα αναρωτιέται κατά πόσο οι επιστήμονες στην προσπάθειά τους να ανακαλύψουν ακόμη περισσότερα πράγματα για το σύμπαν και τον κόσμο γύρω μας μπορεί να δημιουργήσουν μία μαύρη τρύπα στο εργαστήριο και κατά πόσο υπάρχει ο κίνδυνος (παρανόηση α) μία μαύρη τρύπα να ρουφήξει τελικά τα πάντα στο σύμπαν. Σε αυτή την ερώτηση, η κα. Μελίντα, εφευρίσκει ένα υποθετικό σενάριο όπου ο Ήλιος γίνεται ξαφνικά μία μαύρη τρύπα (όπου αυτή η μαύρη τρύπα έχει την μάζα του Ήλιου) και συζητάει με τον Κώστα κατά πόσο αυτό θα μπορούσε να είναι επικίνδυνο για τη Γη και το υπόλοιπο ηλιακό σύστημα. Η απάντηση του Κώστα είναι πως περιμένει όλο το ηλιακό σύστημα να το «καταπιεί» η μαύρη τρύπα (Βήμα 1: παρουσίαση της εναλλακτικής ιδέας). Τότε, η κα. Μελίντα επισημαίνει ότι κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει γιατί οι μαύρες τρύπες δεν μπορούν να έχουν όση βαρυτική δύναμη θέλουν, αλλά υπακούν στους νόμους της φύσης (Βήμα 2: γνωστική σύγκρουση). Στη συνέχεια, η κα. Μελίντα τονίζει πως όλα τα σώματα υπόκεινται στους νόμους της βαρύτητας, πράγμα που σημαίνει πως η βαρυτική έλξη εξαρτάται από τη μάζα και την απόσταση μεταξύ των αντικειμένων και όχι από το είδος του αντικειμένου, δηλαδή αν είναι μαύρη τρύπα, αστέρι ή πλανήτης. Έτσι, καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι αφού αυτή η μαύρη τρύπα έχει ίση μάζα με του Ήλιου τότε και η βαρυτική της δύναμη δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτού του Ήλιου, οπότε και το ηλιακό μας σύστημα είναι ασφαλές (Βήμα 3: Ανατροπή της εναλλακτικής ιδέας).

Επίσης, ο Κώστας αναφέρει ότι έχει διαβάσει πως οι μαύρες τρύπες μπορούν να καταπιούν ολόκληρα αστέρια και ρωτάει (παρανόηση β) αν υπάρχει κάτι που θα μπορούσε να ξεφύγει από την μαύρη τρύπα, π.χ. το φως, ή αν από τη στιγμή που βρίσκεται κοντά της είναι καταδικασμένο να πέσει μέσα της (Βήμα 1: παρουσίαση της εναλλακτικής ιδέας). Τότε, η κα. Μελίντα επισημαίνει ότι όντως οι μαύρες τρύπες μπορούν να καταπιούν ολόκληρα αστέρια, αρκεί βέβαια αυτά να είναι αρκετά κοντά! Παρόλα αυτά, δεν ισχύει ότι ούτε το φως δεν μπορεί να ξεφύγει από μια μαύρη τρύπα (Βήμα 2: γνωστική σύγκρουση). Στη συνέχεια, η κα. Μελίντα βρίσκει την ευκαιρία να μιλήσει για την ακτινοβολία Hawking, η οποία θεωρείται σήμερα από τους επιστήμονες ότι μπορεί να διαφύγει από την βαρύτητα μιας μαύρης τρύπας (Βήμα 3: Ανατροπή της εναλλακτικής ιδέας). Αν και όχι πειραματικά επιβεβαιωμένη, εξαιτίας των όχι αρκετά προηγμένων οργάνων που έχουμε, η ακτινοβολία Hawking αποτελεί ένα αναμενόμενο και λογικό μέρος της πραγματικότητας για τους περισσότερους επιστήμονες του κλάδου.

ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κύριος στόχος αυτής της εργασίας ήταν η δημιουργία ενός ανατρεπτικού κειμένου που να μπορεί να αξιοποιηθεί στη διδασκαλία της ενότητας της Β' Λυκείου. Για τον σκοπό αυτό, έγινε η βιβλιογραφική αναζήτηση για τον εντοπισμό των εναλλακτικών ιδεών σχετικά με την έννοια των μαύρων τρυπών. Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση φάνηκε ότι υπάρχουν ελάχιστες εργασίες που ασχολούνται με το θέμα, και ότι η έρευνα πάνω στο πεδίο αυτό είναι περιορισμένη. Παρόλα αυτά, εντοπίστηκαν δύο εναλλακτικές ιδέες για τις μαύρες τρύπες, οι οποίες φαίνεται να εμφανίζουν μεγαλύτερη δημοφιλία. Αυτές είναι ότι α) οι μαύρες τρύπες θα ρουφήξουν τα πάντα στο σύμπαν (Riggs, 2019), και β) οι μαύρες τρύπες ότι είναι «μαύρες» σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (Pinochet, 2019).

Το ανατρεπτικό κείμενο που προτείνεται στην εργασία αυτή, σχεδιάστηκε με βάση την παραπάνω ανασκόπηση και διαπραγματεύεται της δύο αυτές εναλλακτικές ιδέες. Συγκεκριμένα, με αφορμή τις ερωτήσεις του Κώστα, η κ. Μελίνα συζητάει μαζί του, την φύση των μαύρων τρυπών ακολουθώντας τα τρία βήματα που περιλαμβάνει κάθε φορά ένα ανατρεπτικό κείμενο (παρουσίαση της εναλλακτικής ιδέας, γνωστική σύγκρουση και ανατροπή της εναλλακτικής ιδέας) (Schroeder & Kucera, 2022). Σε αυτήν την συζήτηση αναδεικνύονται οι δύο δημοφιλέστερες εναλλακτικές ιδέες για τις μαύρες τρύπες, γίνεται προσπάθεια να ανατραπούν θέτοντας κατάλληλα ερωτήματα και τέλος παρέχονται ερμηνείες που είναι πιο κοντά στην επιστημονική άποψη. Συγκεκριμένα, η συζήτηση περιστρέφεται γύρω από το τι θα γινόταν στην περίπτωση που ξαφνικά ο ήλιος γινότανε μαύρη τρύπα, αν θα ρουφούσε τη Γη ή όχι και αν όχι γιατί; Έπειτα, γίνεται λόγος για το κατά πόσο υπάρχουν στη φύση στοιχεία που μπορούν να ξεφύγουν από τις μαύρες τρύπες. Τέλος, η συζήτηση καταλήγει στην ακτινοβολία Hawking, και πως σε ένα πιο θεωρητικό επίπεδο θα μπορούσε να υπάρχει «κάτι» που να μπορεί να ξεφύγει από τη μαύρη τρύπα. Η αποτελεσματικότητα του ανατρεπτικού κειμένου μπορεί να διερευνηθεί στο πλαίσιο μιας μελλοντικής έρευνας που θα περιλαμβάνει διδακτική και μαθησιακή παρέμβαση στην δευτεροβάθμια εκπαίδευση για την κατανόηση της έννοιας της μαύρης τρύπας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βοσνιάδου, Σ. (1999). Η εννοιολογική αλλαγή στην παιδική ηλικία, στο Βοσνιάδου (επ.), *Σκέψη*, Gutenberg, Αθήνα.
- Akiyama, K., Alberdi, A., Alef, W., Asada, K., Azuly, R., Bacsko, A. K., & Ramakrishnan, V. (2019). First M87 event horizon telescope results. IV. Imaging the central supermassive black hole. *The Astrophysical Journal Letters*, 875(1), L4. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0e85>
- Bowyer, S., Byram, E. T., Chubb, T. A., & Friedman, H. (1965). Cosmic X-ray sources. *Science*, 147(3656), 394-398. <https://doi.org/10.1126/science.147.3656.394>
- Brush, S. G. (1999). Why was relativity accepted?. *Physics in perspective*, 1, 184-214. <https://doi.org/10.1007/s000160050015>
- Celotti, A., Miller, J. C., & Sciamia, D. W. (1999). Astrophysical evidence for the existence of black holes. *Classical and Quantum Gravity*, 16(12A), A3. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/16/12A/301>
- Comins, N. F. (2001). *Heavenly errors: Misconceptions about the real nature of the universe*. Columbia University Press. <https://doi.org/10.7312/comi11644>
- Einstein, A. (1939). On a stationary system with spherical symmetry consisting of many gravitating masses. *Annals of Mathematics*, 922-936. <https://doi.org/10.2307/1968902>
- Hawking, S. W. (1974). Black hole explosions?. *Nature*, 248(5443), 30-31. <https://doi.org/10.1038/248030a0>
- Hawking, S. W. (1976). Black holes and thermodynamics. *Physical Review D*, 13(2), 191. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.13.191>

Kalogera, V., & Baym, G. (1996). The maximum mass of a neutron star. *The Astrophysical Journal*, 470(1), L61. <https://doi.org/10.1086/310296>

Michell, J. (1784). VII. On the means of discovering the distance, magnitude, &c. of the fixed stars, in consequence of the diminution of the velocity of their light, in case such a diminution should be found to take place in any of them, and such other data should be procured from observations, as would be farther necessary for that purpose. By the Rev. John Michell, BDFRS In a letter to Henry Cavendish, Esq. FRS and AS. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, (74), 35-57. <https://doi.org/10.1098/rstl.1784.0008>

Misner, C.W., Thorne, K.S., & Zurek, W.H. (2009). John Wheeler, relativity, and quantum information. *Physics Today*, 62(4), 40-46. <https://doi.org/10.1063/1.3120895>

Montgomery, C., Orchiston, W., & Whittingham, I. (2009). Michell, Laplace and the origin of the black hole concept. *Journal of Astronomical History and Heritage*, 12, 90-96. <https://doi.org/10.1088/13616552/ab26c3>

Petrescu, R. V., Aversa, R., Apicella, A., & Petrescu, F. I. (2018). NASA has found the most distant black hole. *Journal of Aircraft and Spacecraft Technology*, 2(1), 31-39. doi:10.3844/jastsp.2018.31.39

Pinochet, J. (2019). 'Black holes ain't so black': an introduction to the great discoveries of Stephen Hawking. *Physics Education*, 54(3), 035014. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab0e9a>

Pinochet, J. (2019). Five misconceptions about black holes. *Physics Education*, 54(5).

Riggs, P. J. (2019). Black holes: basic concepts and popular misconceptions. *Physics Education*, 54(6). <https://doi.org/10.1088/1361-6552/ab3c86>

Schroeder, N.L., & Kucera, A.C. (2022). Refutation text facilitates learning: A meta-analysis of between-subjects experiments. *Educational Psychology Review*, 34(2), 957-987. <https://doi.org/10.1007/s10648-021-09656-z>

Schwarzschild, K., & Schwarzschild, K. (1992). Biography of Karl Schwarzschild (1873-1916). *Gesammelte Werke Collected Works: Volume 1*, 1-28. https://doi.org/10.1007/978-3-642-58086-4_1

Thagard, P. (1993). *Conceptual revolutions*. Princeton University Press.

Vosniadou, S. (2013). Reframing the classical approach to conceptual change: Preconceptions, misconceptions and synthetic models. In S. Vosniadou (Ed.) *International handbook of science education, 2nd Edition* (pp. 119-130). Springer. <https://doi.org/10.4324/9780203154472>

Wheeler, J. A., & Ford, K. (1998). *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics*. W. W. Norton & Company.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ανατρεπτικό κείμενο για την παρανόηση «οι μαύρες τρύπες μπορούν να ρουφήξουν τα πάντα στο σύμπαν»

Μεσημεριανή εκπομπή «Μαθαίνοντας για τις Επιστήμες» σε ραδιοφωνικό σταθμό. Φιλοξενούμενοι, ο Κώστας, μαθητής Β' Λυκείου, και η κ. Μελίνα, φυσικός εξειδικευμένη στις μαύρες τρύπες. Ο Κώστας έχει διαβάσει πολλά άρθρα που εστιάζουν στον κίνδυνο, κάποια μαύρη τρύπα που θα δημιουργηθεί στο εργαστήριο να ρουφήξει όλη την Γη. Έτσι, ακολουθεί η παρακάτω συζήτηση:

Βήμα 1: Παρουσίαση εναλλακτικής ιδέας

Κώστας:

Κυρία Μελίνα, να σας ρωτήσω κάτι, έχετε αυτές τις ειδήσεις που λένε για τον κίνδυνο να δημιουργηθεί μια μαύρη τρύπα στο εργαστήριο και να ρουφήξει όλη τη Γη;

Κ. Μελίνα:

Ναι, Κωστάκη, τις έχω δει! Εσένα τι σε προβληματίζει σε αυτές;

Κώστας:

Ότι μπορεί να γίνει κάποιο λάθος και να πεθάνουμε όλοι. Το πρόβλημα είναι πως δεν ξέρω και πολλά πράγματα για τις μαύρες τρύπες, μόνο ό,τι έχω διαβάσει σχετικά με αυτές τις τελευταίες μέρες.

Κ. Μελίνα:

Πολύ ωραία, άρα έχεις κάνει ήδη την έρευνά σου. Από αυτά που έχεις διαβάσει τι έχεις καταλάβει ότι είναι οι μαύρες τρύπες;

Κώστας:

Ότι είναι τα πιο «δυνατά» πράγματα στο σύμπαν και μπορούν να ρουφήξουν τα πάντα!

Κ. Μελίνα:

Πολύ ωραία! Για να δούμε λοιπόν πόσο δυνατές είναι, θέλεις να κάνουμε ένα νοητικό πείραμα; Σκέψου, αν κρατούσαμε την μάζα του ήλιου ίδια και κάναμε τον ήλιο μαύρη τρύπα, τι θα συνέβαινε στο ηλιακό σύστημα; Θα καταστρεφότανε;

Κώστας:

Ναι! Εννοείται! Πρώτα, θα έτρωγε τον Ερμή που είναι ο πιο κοντινός πλανήτης, μετά την Αφροδίτη, μετά εμάς και σιγά σιγά έναν έναν όλους τους πλανήτες!

Βήμα 2: Γνωστική σύγκρουση για την εναλλακτική ιδέα

Κ. Μελίνα:

Αυτό θα ήταν ένα όντως πολύ κακό σενάριο για εμάς στη Γη, αλλά παρόλα αυτά, δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο γιατί οι μαύρες τρύπες δεν μπορούν να έχουν όση βαρυτική δύναμη θέλουν, αλλά υπακούν στους νόμους της φύσης!

Βήμα 3: Ανατροπή της εναλλακτικής ιδέας

Κ. Μελίνα:

Εσύ γενικά τι ξέρεις για την βαρύτητα; Από τι εξαρτάται, με βάση τον νόμο της παγκόσμιας έλξης;

Κώστας:

Εξαρτάται από την μάζα των αντικειμένων και την απόστασή τους, και μάλιστα όσο αυξάνει η απόσταση τόσο μειώνεται η βαρυτική δύναμη!

Κ. Μελίνα:

Ακριβώς, άρα δεν παίζει ρόλο αν το σώμα που εξετάζεις είναι ένας πλανήτης όπως η Γη, ή ένα αστέρι ή μία μαύρη τρύπα. Για όλους ισχύουν οι ίδιοι νόμοι για την βαρύτητα.

Κώστας:

Τότε όμως γιατί η μαύρη τρύπα μπορεί να ρουφάει ακόμη και το φως και ο ήλιος όχι.

Κ. Μελίνα:

Η ακριβής εξήγηση έχει πολλά δύσκολα κομμάτια φυσικής μέσα, όπως η σχετικότητα, αλλά θα μπορούσαμε παρόλα αυτά να δώσουμε την εξής εξήγηση. Σκέψου ότι ένα ουράνιο σώμα με τη μάζα του ήλιου όταν είναι αστέρι έχει ακτίνα 700 εκατομμύρια μέτρα, ενώ ως μαύρη τρύπα, έχει ακτίνα 3000 μέτρα. Πότε λοιπόν μπορείς να πλησιάσεις πιο κοντά στο σώμα; Όταν η ίδια μάζα είναι αστέρι ή όταν είναι μαύρη τρύπα;

Κώστας:

Όταν είναι μαύρη τρύπα

Κ. Μελίνα:

Πιο πριν ανέφερες ότι όσο αυξάνεται η απόσταση μικραίνει η βαρυτική δύναμη. Τι συμβαίνει όμως όταν μειώνεται η απόσταση;

Κώστας:

Τότε αυξάνεται η βαρυτική δύναμη!

Κ. Μελίνα:

Ακριβώς, άρα όταν το σώμα μας είναι μαύρη τρύπα σημαίνει ότι μπορούμε να πλησιάσουμε πιο κοντά, με συνέπεια ενώ η μάζα είναι η ίδια, επειδή μικραίνει η απόσταση αυξάνεται η δύναμη!